

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Ing. Daniel Smutný

APLIKACE POVRCHOVÉ DEFEKTOSKOPIE PŘI KONTROLE JAKOSTI POVRCHU

APPLICATION OF FLAW DETECTION METHOD FOR
SURFACE QUALITY INSPECTIONS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Odbor: Metrologie a řízení jakosti
Školitel: Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc. (VUT FSI Brno)

ABSTRAKT

V průběhu zpracování materiálu má na výslednou jakost výrobku vliv řada faktorů. Jedním z těchto faktorů je možnost vzniku různých defektů, ať už se jedná o defekty vnitřní (materiálové), nebo vnější (povrchové). V přesné strojírenské výrobě, především v automobilovém, ložiskovém nebo leteckém průmyslu, je výskyt defektů zcela nepřijatelný. Disertační práce řeší problematiku příčin a důsledků vzniku těchto vad a metod jejich detekce. Ve firmě Mesing, spol. s r.o. byla za tímto účelem vyvinuta nová bezkontaktní optická metoda na kontrolu povrchových vad, která je určena pro 100% automatizovanou kontrolu. Uvedená metoda byla autorem ověřována v rámci řady modelových zkoušek na čtyřech konkrétních typech výrobků. V závěrečné části práce jsou představeny úspěšné realizace automatických zařízení, při jejichž návrhu byly výsledky modelových zkoušek využity.

ABSTRACT

When processing materials, there are a number of factors which influence the final quality of products. The possibility of defects occurrence, both sub-surface and surface ones, is one of the factors. In the precision engineering production, the automotive, bearing or aerospace industry in particular, no level of defects is tolerable. The thesis deals with the causes and consequences of the occurrence of such defects, and the methods for their identification. For this purpose, a new contactless optical method for the fully automatic inspection of the surface defects has been developed by Mesing, spol. s r.o. In order to verify the performance of the aforementioned method, four specific products have been tested by the author using the method. Finally, there are examples of the successful implementation of the automatic machines, for a design of which the results of the model testing were utilized.

KLÍČOVÁ SLOVA

defekt, metody detekce, laser, rozptyl paprsku, modelové zkoušky, automatická kontrola

KEYWORDS

defect, methods of detection, laser, beam spread, model testing, automatic inspection

OBSAH

1. VADY MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ	6
1.1. Charakteristika necelistvostí a makroskopických vad	6
1.1.1 Staženiny	6
1.1.2 Vločkové trhliny	6
1.1.3 Vycezeniny (segregace)	7
1.1.4 Makroskopické nekovové vměstky	7
1.1.5 Podélné trhliny (praskliny)	7
1.1.6 Příčné trhliny (praskliny)	7
1.2 Vady mikrostruktury	7
1.2.1 Oduhličení	7
1.2.2 Řádkovitost	8
1.2.3 Vadné struktury po žhání	8
1.3 Zdroje únavových lomů	8
1.4 Chemická degradace kovu (koroze)	8
1.5 Vady vznikající při obrábění	9
2. BĚŽNĚ POUŽÍVANÉ METODY DETEKCE VAD	10
2.1 Vizuelní metody (VT)	11
2.2 Kapilární metody (PT)	11
2.3 Metoda rozptylových toků (MT)	11
2.4 Zkoušky ultrazvukem (UT)	11
2.5 Metoda vířivých proudů (EC)	12
2.6 Metoda prozařovací (RT)	12
3. HODNOCENÍ KVALITY POVRHU PLOCH VYSOCE PŘESNÝCH SOUČÁSTEK	12
3.1 Metoda snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání	13
4. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY K OVĚŘENÍ METODY SNÍMÁNÍ ROZPTÝLENÉHO LASEROVÉHO PAPERSKU	14
4.1 Testované vzorky součástek	15
4.1.1 Pístnice do automobilových tlumičů	15
4.2 Modelové zkoušky na pístnicích tlumičů	17
4.2.1 Průběh zkoušek na pístnicích	17
4.2.2 Zhodnocení zkoušek na pístnicích	21
5. PŘÍKLADY REALIZACE AUTOMATICKÝCH ZAŘÍZENÍ	21
5.1 Automat na kontrolu povrchu vnějších kroužků val. lož.	21
5.2 Automat na kontrolu pouzder vstřikovacích čerpadel „COMMON RAIL“	21
5.3 Automat na měření úchylek kruhovitosti oběžných drah vnějších kroužků valivých ložisek	22
5.4 Automatická stanice na kontrolu vad vnitřního závitů	22
Seznam použitých zdrojů	24
Seznam autorových publikací	26
Životopis	29

ÚVOD

V současné době jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu přesných strojírenských výrobků, a to nejen z hlediska přesnosti rozměrů, tvaru a polohy funkčních ploch, ale také z hlediska komplexního hodnocení jakosti povrchu těchto ploch. Kromě hodnocení parametrů struktury obrobeného povrchu sem patří také kontrola funkčních povrchů na výskyt nahodilých, lidským zrakem špatně rozpoznatelných defektů. Je všeobecně známo, že každý výrobek nebo jeho polotovary může obsahovat vnitřní nebo vnější nehomogenity (vady). Přítomnost vad v kritických místech funkčních ploch může výrazně ovlivnit funkci a životnost výrobku v konstrukčním celku. Vznik povrchových vad, například na oběžných drahách vysokorychlostních ložisek, může způsobovat zvýšený hluk a vibrace celku, rychlejší opotřebení a v krajním případě také zadření ložiska, což může vést k poškození, nebo až k destrukci celého zařízení. Požadavek, aby výrobek neobsahoval žádné vady, je prakticky zcela nereálný, proto musí být stanoveny (především výrobcem dané komponenty) hranice přípustnosti a nepřípustnosti vad v závislosti na jejich velikosti, typu a četnosti. Na základě provedené kontroly lze pak výrobek označit za vyhovující nebo nevyhovující a určit, zda bude užíván bez ohledu na přítomnost vad, nebo budou-li vady odstraněny, anebo bude výrobek vyřazen jako nepoužitelný.

V průmyslové praxi se ke kontrole vnitřních i vnějších vad výrobků využívá řada metod založených na různých fyzikálních principech. Dle průzkumů je pro zjišťování vnějších povrchových vad stále nejpoužívanější vizuální metoda založená na principu pozorování funkční plochy lidským zrakem. Jedná se o ryze subjektivní metodu, z povahy lidského zraku může být řada významných vad lehce přehlédnutelná. Vizuální metoda je relativně pomalá, nespolehlivá a v konečném důsledku může být i velmi drahá. Povrchové vady se také často kontrolují až na finálním výrobku. Obecně je ale výhodnější kontrolovat vady již při mezioperačních kontrolách, aby se zabránilo průchodu výrobků vykazujících přítomnost vady další fází výrobního procesu, a tím nedocházelo ke zbytečnému nárůstu výrobních nákladů.

Současným trendem u velkosériové výroby je zavádět 100% automatizovanou kontrolu produkce zařazenou přímo do výrobního procesu a s úplným vyloučením vlivu lidského faktoru. Řada v praxi běžně používaných metod je pro automatizovanou kontrolu vysoce přesných strojních komponent (např. v automobilovém či ložiskovém průmyslu) často zcela nevhodná. Většinou jsou příliš pomalé, vyžadují přípravu, poškozují kontrolovaný povrch, nejsou schopny detekovat vady o velikosti v řádu setin mm anebo jsou drahé. Smyslem je tedy nalézt a vhodně aplikovat takové metody, které umožní spolehlivou, rychlou a levnou kontrolu vad.

Vývojem metod detekce povrchových vad se mimo jiné zabývá brněnská firma Mesing, spol. s r.o., která je výrobcem automatizační a měřicí techniky. Autor disertační práce pracuje v této firmě jako konstruktér a vývojový pracovník a je zodpovědný za vývoj, ověřování a aplikaci metod detekce povrchových vad do kontrolních zařízení. Firma Mesing, spol. s r.o. ve spolupráci s Ústavem měření

SAV v Bratislavě a za podpory grantu MPO F1-IMS/97 byla vyvinula novou bezkontaktní metodu založenou na principu snímání rozptýleného laserového paprsku na povrchové vadě. Tuto metodu hodlá Mesing po řadě ověřovacích modelových zkoušek aplikovat do svých kontrolních stanic a automatů.

Disertační práce řeší problematiku hodnocení kvality výrobků komplexně. Úvodní část práce se zaměřuje na základní přehled technologií zpracování ve strojírenství a hodnocení vlastností použitých materiálů včetně jejich zkoušení. Správná volba obou těchto faktorů má výrazný vliv na konečný vzhled, kvalitu a užité vlastnosti výrobku.

V další části se autor věnuje posouzení nejčastěji se vyskytujícími vnitřními a vnějšími defektů (vad) materiálu z hlediska příčin a důsledků jejich vzniku. Následně je proveden rozbor jak běžně používaných, tak i zcela nových metod detekce vad materiálu.

Praktická část práce se zabývá již hodnocením povrchových vad u čtyř konkrétních výrobků, které byly jejich výrobcem poskytnuty autorovi jako vzorky pro ověřovací modelové zkoušky nově vyvinuté metody snímání rozptýleného laserového paprsku. V této části je popsán i průběh jednotlivých modelových zkoušek včetně vyhodnocení dosažených výsledků.

V závěru práce autor uvádí příklady úspěšné aplikace metod detekce povrchových vad vyvíjených ve firmě Mesing, spol. s r.o. ve spolupráci s Ústavem měření SAV v Bratislavě a partnerskou německou firmou OptoSurf.

1. VADY MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ

Vada (diskontinuita, necelistvost, nehomogenita a obdobné názvy tohoto pojmu) výrobku je odchylka provedení výrobku od vlastností předepsaných v technických normách nebo v jiných technických dokumentech, podle nichž je výrobek zkoušen a prodáván [1].

Vada opravitelná je vada výrobku, kterou lze opravit nebo odstranit vhodným způsobem, předepsaným v technických normách nebo jiných technických dokumentech, podle nichž je výrobek zkoušen a dodáván [1].

1.1 CHARAKTERISTIKA NECELISTVOSTÍ A MAKROSKOPICKÝCH VAD

Příčina řady vad hutních a strojních výrobků je jednoznačná a dá se spolehlivě zjistit v kterékoliv výrobní fázi. Typickým příkladem jsou vycezeniny, makroskopické vměstky, vločkové trhliny. Jiné vady se stejným konečným vzhledem mohou mít však řadu odlišných prvotních příčin. To platí hlavně o vadách povrchových, trhlinách, plenách, do určité míry i o dutinách a dvojitostech, které často mění svůj charakter tvářením za tepla i za studena; určení zdroje vady je pak velmi obtížné. Z tohoto důvodu je významné shrnutí společných znaků hlavních vad, jejich zjišťování a vliv na vlastnosti a technologickou zpracovatelnost [1].

1.1.1 Staženiny

Staženina má ve válcovaných výrobcích vzhled rozsáhlé necelistvosti, probíhající obvykle v osové oblasti vývalku v podélném směru. Na příčném řezu vývalkem má vzhled nepravidelné dutiny (u vývalku velkých průřezů) nebo nepravidelně tvarované i rozvětvené trhliny (u vývalků malých průřezů jako jsou tyče, dráty). U ploché oceli a tlustých plechů se projevují jako rozdvojení. Na lomové ploše se staženina rozezná podle výstupkovité nepravidelnosti lomové plochy v osové oblasti; někdy se lámavá tyč podélně rozštěpí. U tvarových vývalků vyvolá staženina jejich vyboulení nebo jinou deformaci. Staženina může být z části i zcela vyplněna struskou [1].

1.1.2 Vločkové trhliny

Vločkové trhliny – vločky – jsou vnitřní plošné necelistvosti, široké jen několik desetin milimetru. Na řezech ocelovými výrobky nejsou zpravidla bez zvláštní přípravy viditelné. Vyskytují se převážně u ocelí vyšších pevností (600 MPa a více) a větší průřezů (přibližně od 50mm výše). Na lomové ploše mají vločky vzhled stříbřitě lesklých plošek obvykle kruhového nebo eliptického obrysu, ostře ohraničených od okolní strusky lomu. Nejčastěji mají průměr několik milimetrů, ale mohou být velké i 15 – 20mm. Na mikroskopickém vyleštěném výbrusu se jeví jako tenké křivolaké trhlínky, probíhající nejčastěji ve směru tváření oceli, ale i šikmo nebo napříč vláken [1].

1.1.3 Vycezeniny (segregace)

Vycezeniny jsou makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků, fosforu, síry, uhlíku, případně i dalších prvků, vyvolané vlivem segregáčních jevů při tuhnutí oceli. U neuklidněných ocelí zauímají vycezeniny celou středovou oblast, zřetelně ohraničenou od obvodové vrstvy čistého kovu. U uklidněných ocelí se vyskytují rozptýleně po průřezu nebo soustředně do osové oblasti podle charakteru tuhnutí ingotu. Směrem k hlavě ingotu se množství a intenzita vycezenin zvyšují. Při válcování za tepla se vycezeniny usměrňují se směru tváření a dávají vznik řádkovitému uspořádání struktury [1].

1.1.4 Makroskopické nekovové vměstky

Jako makroskopické nekovové vměstky se označují cizorodé nekovové částice, shluky, žíly nebo řetězce částic, viditelné pouhým okem. Vyskytují se v různých místech průřezu jednotlivě i hromadně. Jsou bělavé, žlutavé, šedé až černé („písek“, „šamot“, „struska“).

1.1.5 Podélné trhliny (praskliny)

Tato nejrozšířenější vada válcované oceli může mít řadu příčin, vedoucích ke stejnému vzhledu vady. Podélné trhliny jsou necelistvosti povrchu výrobku probíhající přímočaře a rovnoběžně s podélnou osou vývalku. Mohou být vlasové, sotva postřehnutelné až široce rozevřené, hluboké od několika setin milimetru do desítek milimetrů, dlouhé desítky milimetrů až desítky metrů. Orientovány jsou většinou kolmo nebo mírně šikmo k povrchu. Vyskytují se na hranách i stěnách vývalku [1].

1.1.6 Příčné trhliny (praskliny)

Příčné trhliny jsou povrchové necelistvosti, různě hluboké a rozsáhlé, s boky vláknitými, zrnitými i složitě členitými, které jsou povšechně orientované kolmo na směr tváření (vláken). Vyskytují se na hranách i stěnách výrobků. Vznikají v prvním údobí tváření (válcování nebo kování). Při dalším tváření se rozevírají a jejich okraje se postupně protahují do podoby širokého V nebo X. Pak se jim říká též „trhliny rozvětvené“. Jsou to tak nápadné povrchové necelistvosti, že se materiál s těmito vadami může dostat k odběrateli jen výjimečně [1].

1.2 VADY MIKROSTRUKTURY

V této kapitole jsou uvedeny vybrané strukturní vady, se kterými je možno se nejčastěji setkat v ocelových tvářených hutních výrobcích ve stavu přírodním, žíhaném normalizačně nebo na měkko tak, jak se obvykle dodávají z hutí.

1.2.1 Oduhličení

Oduhličení vzniká ochuzením povrchové vrstvy o uhlík. Obsah uhlíku je proto nejnižší u povrchu a zvětšuje se směrem do materiálu. V soulase s tím se mění i mikrostruktura. V povrchových oblastech úplně ochuzených o uhlík je struktura feritická. Pod ní, v oblastech jen částečně ochuzených, je pak

smíšená struktura. V ní se podíl feritu se stoupajícím obsahem uhlíku zmenšuje až do hloubky, v níž struktura odpovídá obsahu uhlíku dané oceli a příslušnému zpracování (perlit, bahnit, martensit apod.) [1].

1.2.2 Řádkovitost

Řádkovitost charakterizuje celkem nepravidelné uspořádání přítomných strukturních částí do výrazných řádků. Řádkovitost u ocelí podeutektoidních, kdy se například v přírodním stavu ve struktuře střídají různě široké řádky feritu a perlitu, se označuje jako strukturní řádkovitost. Řádkovitost u ocelí nadeutektoidních, zvláště výše legovaných (většinou nástrojových, např. rychlořezných apod.), kdy řádky tvoří většinou hrubší až hrubé karbidy, se označuje jako karbidická řádkovitost. Pokud se u některých typů ocelí vyskytují velmi jemné karbidy seskupené do větších řádků nebo strukturní nestejnorodost, která se po naleptání jeví buď jako světlé nebo tmavé pruhy, pak se tyto případy obvykle označují jako pruhovitost [1].

1.2.3 Vadné struktury po žihání

U tvářených ocelí hutních výrobků, dodávaných ve stavu normalizačně žíhaném nebo žíhaném na měkko, se za vadné označují struktury neodpovídající účelu, pro který bylo žihání použito. Je-li účelem normalizačního žihání především vytvoření jemnozrnné a rovnoměrné struktury, sestávající se obvykle ze směsi perlitu, je výskyt jiné struktury nežádoucí [1].

1.3 ZDROJE ÚNAVOVÝCH LOMŮ

Rotující součásti strojů, jako hřídele, osy a nápravy, jsou za provozu vystavovány cyklicky opakovaným namáháním, která vznikají v průběhu každé otáčky, dosahují maxima a pak zase zmenšují na nulu, přičemž se napětí mění z napětí takového na tlakové a naopak. Tyto změny napětí nastávají ve všech bodech rotujícího tělesa a přitom se velikost napětí zmenšuje směrem od povrchu k ose součásti. Nezatížená zůstává pouze osa. Horní vlákna zatížená nápravou jsou stlačována, spodní jsou tažena a tato napětí se mění během každé otáčky. Opakovaná napětí porušují kov mnohem více než napětí statická a při dynamickém namáhání se materiál zlomí při mnohem nižším napětí, než je jeho pevnost v tahu. Porušení kovu opakovaným namáháním je známo jako únava a maximální napětí, které kov vydrží, aniž se poruší za určitý počet cyklů namáhání, se nazývá mez únavy [1].

1.4 CHEMICKÁ DEGRADACE KOVU (KOROZE)

Chemická degradace (koroze) probíhá díky chemickému působení složek prostředí na materiál. Pokud koroze materiálu nastane, lze ji v průmyslové praxi považovat za určitou formu vady materiálu, která nepříznivě ovlivňuje jeho vlastnosti. Podle druhu prostředí, kterému je materiál vystaven, lze rozlišovat korozi v plynném prostředí a korozi v kapalném prostředí [6].

1.5 VADY VZNIKAJÍCÍ PŘI OBRÁBĚNÍ

Na obrobené ploše se může vyskytovat řada povrchových vad, které mohou mít více příčin vzniku. V první řadě to mohou být vady, které prakticky nesouvisí s daným postupem obrábění a vznikly již dříve při odlévání nebo tváření. Jsou to například vady typu staženin, vměstků apod. Pokud se tyto vady vyskytují nehluboko pod povrchem, mohou být v některých případech odkryty následným obráběním povrchu, čímž vzniknou různé prohlubně či důlky (lunkry).

Další skupinou vad jsou pak vady vzniklé přímo při procesu obrábění. Takto vzniklé vady mají prakticky vždy charakter povrchových vad. Pokud vady vzniknou při hrubém opracování povrchu (frézování, soustružení, vrtání), lze tyto částečně odstranit následnými dokončovacími procesy (broušení, honování, lapování, superfinišování apod.). To je však limitováno velikostí povrchové vady (především její hloubkou) ve vztahu k velikosti přídavku materiálu na jemné obrábění. Pokud však povrchová vada vznikne až při závěrečném jemném dokončování povrchu, pak je povrch prakticky znehodnocen. Otázkou je, do jaké míry byla narušena celistvost povrchu a zda má vzniklá vada vliv na funkčnost nebo životnost dílu.

Mezi nejčastěji se vyskytující vady při obrábění patří:

- **rýhy**

Rýhy se na ploše vyskytují jako náhodně orientované nebo orientované ve směru obrábění. Velikost rýh (délka a šířka) se může pohybovat od jednotek setin milimetru až po jednotky milimetrů. Rýhy se mohou na povrchu objevovat samostatně (většinou náhodně orientované) nebo ve formě jemných škrábanců (rovnoběžné rýhy ve směru obrábění). Někdy je možné při vizuálním pozorování povrchu mylně považovat za rýhu i vlasovou trhlinu.

- **nedokonale obrobený povrch**

Tento typ vady nelze v pravém slova smyslu považovat za klasickou povrchovou vadu, jelikož není narušena celistvost povrchu obrobené plochy. Důsledkem vzniku takovéto vady je však dosažení nerovnoměrné struktury povrchu obrobené plochy a není tedy zaručena funkčnost dílu v konstrukční sestavě (zvýšené tření, nadměrné zahřívání, nedokonalé mazání apod.). Příčinou vzniku může být například nevhodný přítlak obráběcích prvků, nesymetrický rozkmit, nevhodná (zkrácená) doba dokončování apod. Vada se projevuje nedobroušenými (nebo nedosuperfinišovanými) ploškami na funkční ploše součásti, pouhým okem je rozpoznatelná rozdílná drsnost povrchu, což například u oběžných drah ložisek je zcela nepřijatelné. V určitých případech lze tuto vadu povrchu ještě odstranit následným dokončováním.

- **tvárové odchytky povrchu**

Mezi závažné vady tohoto typu patří periodické odchytky tvaru – vlnitost povrchu. U součástí rotujících vysokou rychlostí (hřídele převodovek, vačkové hřídele, klikové hřídele apod.) uložených ve válečkových nebo kluzných

ložiskách, má vlnitost povrchu velmi zásadní vliv na vznik vibrací v ústrojí a jeho hluchnost. Nízké počty vln na povrchu nejsou podstatné, větší vliv mají především vysoké počty vln a to i v řádu drsnosti. Nejčastější příčinou vzniku hluku jsou tzv. „vrásky“ (angl. chatter marks), což jsou krátkovlnné složky vlnitosti. Tyto vady vznikají při broušení nebo finišování povrchu (např. oběžných drah ložisek) a příčinou bývá nejčastěji opotřebovaný brusný kotouč, jeho nesymetrický rozkmit, příliš vysoké řezné síly apod. Amplituda „vrásek“ se pohybuje v rozmezí 0,01 μ m až 1 μ m. Například u automobilových převodovek spadají „vrásky“ řádově (počet vln po obvodu) do rezonančních frekvencí převodovky. Už i pouhá amplituda 0,05 μ m postačuje k tomu, aby převodovka nepřijatelně vibrovala a s tím byla spojena i její výrazná hluchnost.

- **spáleniny po broušení**

Při broušení může docházet, vlivem nedostatečného chlazení nebo velkým úběrem materiálu, k nežádoucímu teplotnímu zatížení povrchové vrstvy a ke vzniku tepelného poškození, které se nazývá spálenina po broušení a většinou má lokální charakter. Důsledkem strukturních a napětových změn na povrchu dílu mohou vznikat povrchové trhliny, které mají zásadní vliv na funkční vlastnosti dílu. Spáleniny po broušení se mohou projevovat i vyšší hodnotu drsnosti povrchu oproti „nepostiženému“ místu.

2. BĚŽNĚ POUŽÍVANÉ METODY DETEKCE VAD

Pro detekci vad, ať už se jedná o vady vnitřní či povrchové, existuje řada běžných metod, které využívají odlišné fyzikální principy. Zjišťování vad defektoskopickými zkouškami je většinou nepřímé. Prostředníkem je fyzikální veličina (elektromagnetické vlnění, mechanické vlnění apod.), která v interakci s prostředím (zkoušeným materiálem součástky) mění své parametry.

Kontrolní metody lze obecně rozdělit do dvou základních skupin:

- destruktivní (DT),
- nedestruktivní (NDT).

Podle schopnosti zjištění vad se defektoskopické metody dále dělí:

- metody zjišťování vad nacházejících se na povrchu nebo v blízkosti povrchu materiálu (trhliny, plošky, rýhy apod.),
- metody zjišťování vnitřních vad (dutiny, bubliny, vměstky apod.).

Podle způsobu provádění se metody dále dělí na:

- kontaktní,
- bezkontaktní.

2.1 VIZUÁLNÍ METODY (VT)

Všeobecně lze vizuální kontrolu rozdělit do dvou základních kategorií pro její provedení, a to na *přímou* a *nepřímou*, pokud se používá pro stanovení shody výrobku se specifikovanými požadavky (stav povrchu výrobku, provedení lícovacích ploch nebo geometrického tvaru výrobku) [1].

Přímá vizuální kontrola je definována jako kontrola, při které není narušena optická dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou. Kontrola se provádí bez pomůcek nebo s pomůckami (např. zrcadlo, lupy, endoskopy apod.). *Nepřímá vizuální kontrola* se používá v případech, kdy není přímá vizuální kontrola proveditelná jednak z důvodů nepřístupnosti (tlakové nádoby, potrubní systémy) nebo z důvodu bezpečnosti (ionizující záření apod.).

2.2 KAPILÁRNÍ METODY (PT)

Moderní kapilární metody jsou samostatným oborem nedestruktivního zkoušení materiálu. Využívají kapilárních vlastností některých kapalin, zvaných penetranty, ke zjišťování povrchových necelistvostí materiálu, jako např. trhlin, studených spojů, porózity apod. Zjišťování vnitřních vad, nemajících spojení se zkoušeným povrchem, není těmito metodami možné. Kapilární metody jsou založeny na využití charakteristických vlastností fázových rozhraní a jevů, označovaných jako kapilární jevy nebo kapilární vlastnosti kapalin [1].

2.3 METODA ROZPTYLOVÝCH TOKŮ (MT)

Metoda rozptylových toků, také často označovaná jako magnetická metoda prášková, je principiálně velmi jednoduchá metoda. Jestliže máme feromagnetický materiál, v němž se vyskytují povrchové vady (nebo v blízkosti povrchu lokalizované trhliny), pak se při zmagnetování tohoto materiálu magnetickým polem vytvoří v místě trhlin magnetický rozptylový tok, vystupující z materiálu nad jeho povrch. Tento rozptylový tok je možné indikovat buď magnetickým práškem, nebo sondami [1].

2.4 ZKOUŠKY ULTRAZVUKEM (UT)

Ultrazvuk je jednou ze základních metod nedestruktivního zkoušení. Ultrazvuková metoda umožňuje zjistit přítomnost vnitřních vad materiálu, a to i ve velké hloubce pod povrchem. UT metoda má největší dosah se všech NDT metod. Je využívána především pro zkoušení tvářených polotovarů (plechy, výkovky, tyče), svarů a odlitků. Uplatňuje se však významně i při zkoušení různých typů nekovových materiálů, jako jsou některé typy plastů a kompozitů. Výhodou této metody je možnost automatizace procesu kontroly, především u polotovarů jednoduchého tvaru (trubky, plechy, tyče apod.). Kromě vnitřních vad typu trhlin, dvojitosti, dutin apod. je možno zjišťovat i vady povrchové. Mezi další výhody patří např. okamžité zobrazení výsledků zkoušky [1].

2.5 METODA VÍŘIVÝCH PROUDŮ (EC)

Metoda vířivých proudů při kontrole materiálů, polotovarů a výrobků je založena na tom, že se zkoušený objekt, jenž má určitou elektrickou vodivost, magnetickou permeabilitu a určité rozměry, vystaví působení střídavého magnetického pole vytvořeného budicí cívkou, která je napájena střídavým proudem. V tomto objektu se indukují vířivé proudy, jež svým magnetickým účinkem působí zpětně na magnetické pole původní – budicí. Tato dvě magnetická pole (primární od budicí cívky a reakční od vířivých proudů) se

vektorově skládají ve výsledné pole, které závisí na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného objektu. V měřicím vinutí snímače se tedy indukuje napětí ovlivněné magnetickými a elektrickými parametry kontrolovaného objektu. Princip kontroly pomocí vířivých proudů spočívá v tom, že strukturní stav materiálu změny uvedené magnetické a elektrické parametry, nebo přítomnost vady přerušuje část drah vířivých proudů, takže jejich zpětný účinek na budící pole se změní [1].

2.6 METODA PROZAŘOVACÍ (RT)

Radiografie umožňuje získat trvalý obraz vnitřních vad materiálu (zejména objemových, ale v případě vhodné směrové orientace i plošných). Obvyklé oblasti nasazení metody jsou: kontrola svarů, odlitků (i tvarově velmi složitých), elektrotechnický průmysl, stavební průmysl. Vzhledem ke své průkaznosti a trvalému záznamu je jednou z nejdůležitějších metod při kontrole zařízení s vysokou mírou nebezpečnosti (například tlakových nádob), v leteckém a petrochemickém průmyslu [1].

3. HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PLOCH VYSOCE PŘESNÝCH SOUČÁSTEK

Metody kontroly vad materiálu uvedených v předchozích kapitolách patří v praxi k nejrozšířenějším metodám. Bohužel však řada z nich nespňuje přísné požadavky kladené na automatizovanou kontrolu přesných součástek. V oblasti výroby těchto součástek, kde je požadována vysoká kvalita povrchu funkčních ploch, je nutné provádět prakticky 100% kontrolu všech vyrobených kusů. Výrobci těchto dílů usilují o to, aby měření a kontrola kvality funkčních ploch byla prováděna již v průběhu výroby, to znamená, aby byla začleněna přímo ve výrobních linkách. Především v automobilovém a ložiskovém průmyslu se jedná o série zahrnující výrobní dávky v řádu tisíců až milionů kusů. Takový objem sériové výroby klade vysoké požadavky na takt výrobních linek i kontrolních zařízení. Většina běžných metod není schopna splnit tyto požadavky, proto je nutné aplikovat takové metody kontroly, které budou schopny výrobcem definované vady detekovat s vysokou rozlišitelností. Rychlost kontroly musí být přitom taková, aby kontrolní zařízení zvládalo vysoký takt výrobních strojů (v řádu jednotek sekund) a nedocházelo tak ke zpomalování výrobního procesu.

Na základě vykonaných zkoušek a podrobné analýzy jednotlivých, běžně používaných nebo dostupných metod se ukázalo, že řadu těchto metod lze pro automatizovanou kontrolu vysoce přesných součástek použít pouze s velkým omezením anebo prakticky vůbec. Mezi nejčastější nevýhody testovaných metod patří především nízká rychlost kontroly a neschopnost detekovat vady o rozměrech v řádu desetin až setin mm. U některých testovaných metod je příčinou nepoužitelnosti i fakt, že tyto metody nejsou primárně určeny k detekci povrchových vad.

Z tohoto důvodu se firma MESING, spol. s r.o., za finanční podpory čerpané z grantu IMPULS FI-IMS/97 MPO ČR, zaměřila na vývoj vlastních metod pro

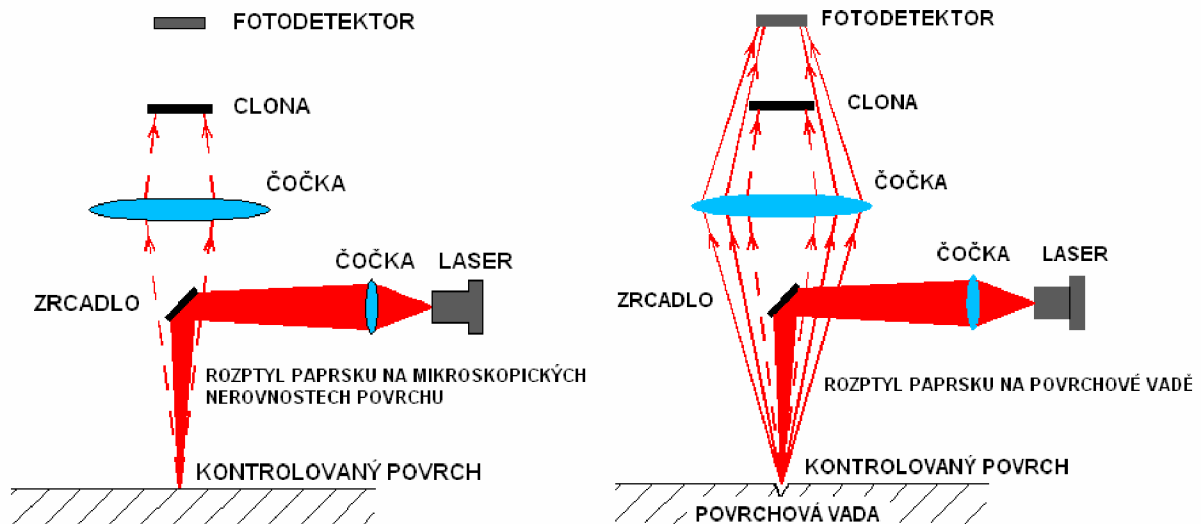
detekování povrchových vad, které by splňovaly vysoké požadavky na automatizovanou kontrolu vysoce přesných dílů v automobilovém a ložiskovém průmyslu.

V následující kapitole je představena nově vyvinutá bezkontaktní metoda, která splňuje náročné požadavky na automatizovanou kontrolu výroby.

3.1 METODA SNÍMÁNÍ ROZPTÝLENÉHO LASEROVÉHO PAPRSKU V KOAXIÁLNÍM USPOŘÁDÁNÍ

Metoda kontroly povrchových vad využívající snímání rozptylu laserového paprsku byla vyvinuta ve spolupráci firmy Mesing, spol. s r.o. s Ústavem měření SAV v Bratislavě. Autor práce je členem řešitelského kolektivu a podílel se na vývoji této metody.

Metoda je založena na jevu, kdy svazek paprsků vycházející z laserové diody se odráží od úhlového zrcadla a dopadá kolmo na kontrolovaný povrch, od kterého se odráží k fotodetektoru umístěného do směru odrazu.



Obr. 3.1 Snímač povrchových vad v koaxiálním uspořádání – rozptyl světla jen na mikroskopických nerovnostech (drsnosti povrchu)

Obr. 3.2 Snímač povrchových vad v koaxiálním uspořádání – rozptyl světla na povrchové vadě

Odražené světlo je zablokované kruhovou clonou a na fotodetektor nedopadá žádné světlo. Velikost clony je volená tak, aby blokovala i rozptýlené světlo vznikající rozptylem paprsku na akceptovatelné drsnosti kontrolovaného povrchu.

V případě, že laserový paprsek dopadne na místo s povrchovou vadou, odražené světlo je rozptýlené do většího prostorového úhlu a pomocí čočky je fokusováno do fotodetektoru. Světlo rozptýlené na přirozené drsnosti povrchu je zachyceno clonou, světlo rozptýlené na povrchové vadě je pak zachyceno fotodetektorem, který snímá intenzitu dopadeného světla. Signál z fotodetektoru je pak následně zesílen a zpracován (např. prahovou komparací).

Jako zdroj laserového paprsku je použita polovodičová laserová dioda, která kontinuálně vyzařuje svazek paprsků o průměru přibližně 0,03 – 0,05 mm. To zaručuje velmi vysokou rychlost kontroly (u současného snímače až 2000mm/s). Snímač tak může být použit pro automatizovanou kontrolu funkčních ploch součástek přímo ve výrobním procesu.

Metoda snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání je metodou dynamickou. To znamená, že kontrolovaná součástka se otáčí kolem osy rotace a snímač plynule pojíždí podél osy rotace součástky (tzv. spirálový způsob snímání používaný u rotačních válcových povrchů) nebo se součástka otáčí kolem osy kolmé na kontrolovaný povrch a snímač pojíždí ve směru kolmém na osu rotace součástky (tzv. gramofonový způsob snímání při kontrole např. rovinných ploch).

Na obr. 3.3 je zobrazen inovovaný laserový snímač v koaxiálním uspořádání.



Obr. 3.3 Inovovaný laserový snímač v koaxiálním uspořádání

4. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY K OVĚŘENÍ METODY SNÍMÁNÍ ROZPTÝLENÉHO LASEROVÉHO PAPRSKU

V experimentální části práce byly provedeny praktické ověřovací zkoušky nově vyvinuté metody snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání. Během zkoušek byla metoda testována na dodaných vzorcích součástek dle požadavků zákazníků (výrobci těchto součástek). Ověřovací zkoušky probíhaly ve firmě Mesing, spol. s r.o. Pro účely zkoušek byla autorem práce navrhnutá a zkonstruována dvě univerzální modelová zařízení, která umožňovala aplikaci testované metody na kontrolu poskytnutých součástek.

4.1 TESTOVANÉ VZORKY SOUČÁSTEK

Praktické zkoušky probíhaly na čtyřech typech součástek, jejichž výrobci kontaktovali firmu Mesing, spol. s r.o. se zájmem o dodání kontrolního zařízení detekujícího povrchové vady vyskytující se na těchto součástkách. Jedná se především o výrobce v automobilovém a ložiskovém průmyslu.

Mezi testované součástky patří tyto:

- pístnice do automobilových tlumičů,
- hřídelky textilních vřeten,
- válečky velkorozměrových ložisek,
- spojky klimatizací.

4.1.1 Pístnice do automobilových tlumičů

Pístnice jsou tyče válcového tvaru, které jsou na obou koncích zakončeny závity. Jednotlivé typy pístnic mají různá provedení. Průměr kontrolovaných pístnic je 11mm, celkové délky pístnic se liší v závislosti na typu tlumiče a pohybují se v rozmezí 300 – 450mm. Délka kontrolované funkční plochy je přibližně 250 - 400mm. Funkční plochy jsou opatřeny tvrdochromovým povlakem pro zvýšení odolnosti proti korozi, zlepšení třecích a těsnicích vlastností. Pochromovaný povrch je následně dokončen broušením. Drsnost povrchu funkčních ploch $R_a = 0,4\mu\text{m}$.



Obr. 4.1 Pístnice do automobilových tlumičů

Výrobce tlumičů specifikoval následující typy povrchových vad, které se mohou v průběhu výroby vyskytnout na funkčních plochách pístnice a jsou nepřijatelné. Jednotlivé typy vad se na povrchu vyskytují samostatně nebo v kombinaci s jinou uvedenou vadou. Jedná se především o tyto typy vad:

- **Podélná rýha**

Jedná se o tenkou rýhu ve směru osy pístnice, která se ve většině případů táhne přes celou délku funkční plochy, případně může být i kratší. V každém případě se však délka podélné rýhy pohybuje minimálně v řádu desítek mm. Podle výrobce se podélná rýha vyskytuje již na polotovarech dodávaných subdodavateli a objevuje se velmi zřídka. U kontrolovaného vzorku je šířka rýhy 0,05mm a postihuje funkční plochu po celé její délce. Podélná rýha je viditelná lidským zrakem, ale je velmi lehce přehlédnutelná.

- **Příčná rýha**

Zde se jedná o velmi jemné rýhy orientované ve směru broušení (kolmo na osu rotace pístnice). Tyto rýhy vznikají většinou při broušení a příčinou bývá vypadené zrno z brusného kotouče. Na kontrolovaném vzorku pístnice se

vyskytovala jedna příčná rýha o šířce 0,2mm (ve směru osy pístnice) a délce 0,9mm (kolmo na osu).

- **Plošky na povrchu**

Plošky se ve většině případů vyskytují na okraji pístnice. Šířka plošky se pohybuje v rozmezí 2-3mm, délka 30-70mm. Jedná se o velmi hrubou vadu povrchu, která vzniká většinou při upínání pístnice do obráběcího stroje. Důsledkem výskytu této vady je únik hydraulického oleje z tlumiče. Tento typ vady se vyskytuje na povrchu zřídka.

- **Záseky**

Vady typu záseků se mohou vyskytovat po celé délce funkční plochy. Příčinou vzniku je především mechanické poškození povrchu při manipulaci. Velikost vad na povrchu (délka, šířka) a jejich hloubka se pohybuje v řádu jednotek mm.

- **Nedobroušený povrch**

Část povrchu funkční plochy pístnice může být nedobroušený. To se projevuje výskytem části plochy, která vykazuje vyšší hodnotu drsnosti povrchu, než je požadováno. Tento typ vady povrchu zapříčiňuje postupné vydírání těsnění, což vede k jeho potupnému opotřebení a následnému úniku hydraulického oleje z pístnice.

- **Spirála**

Jedná se prakticky o nedobroušený povrch po procesu soustružení polotovaru. Spirála se projevuje viditelnými stopami po soustružnickém noži ve tvaru spirály na povrchu. Touto vadou postižený povrch vykazuje vyšší hodnotu drsnosti povrchu.

- **Vytrhaný materiál (lunkry)**

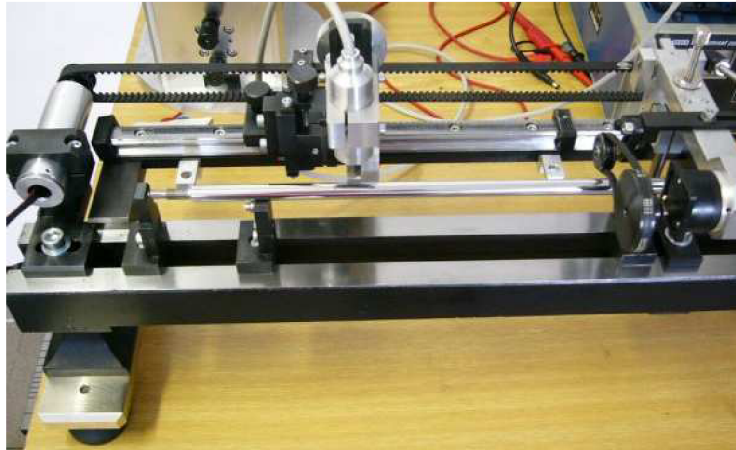
Tato vada vzniká většinou odkrytím vnitřních vad typu dutin nebo vytržením cizorodých částic obsažených v materiálu (vměstků) při následném broušení povrchu polotovaru pístnice.

- **Vtisk**

Vtisk se na pohled projevuje jako mělký důlek kruhového charakteru, který vzniká mechanickým poškozením povrchu pístnice. Přejít vtisku na plochu pístnice je hladký, bez ostrých hran. Na testovaném vzorku se vyskytoval vtisk o průměru 1,2mm a hloubce cca 0,3mm. Vtisků se na povrchu může objevit i několik, většinou však v blízkosti sebe.

4.2 MODELOVÉ ZKOUŠKY NA PÍSTNICÍCH TLUMIČŮ

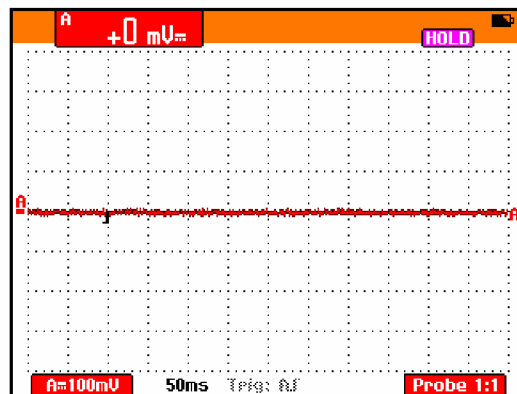
Metoda snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání je metodou dynamickou, tedy kontrolovaná součást se musí otáčet a snímač pojíždí ve směru osy rotace (tzv. spirálový způsob snímání) nebo ve směru kolmém na osu rotace (tzv. gramofonový způsob snímání). V případě kontroly pístnic tlumičů se jedná o spirálový způsob snímání povrchu. K tomuto účelu bylo autorem práce navrženo a zkonstruováno modelové zařízení zobrazené na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Ověřovací modelové zařízení pro kontrolu pístnic

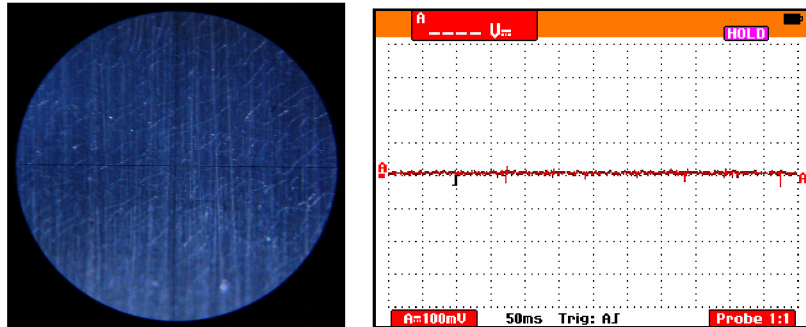
4.2.1 Průběh zkoušek na pístnicích

Na obr. 4.3 je zobrazen základní šum laserového snímače, který vzniká odrazem od ideálního zrcadlového povrchu.



Obr. 4.3 Základní šum laserového snímače

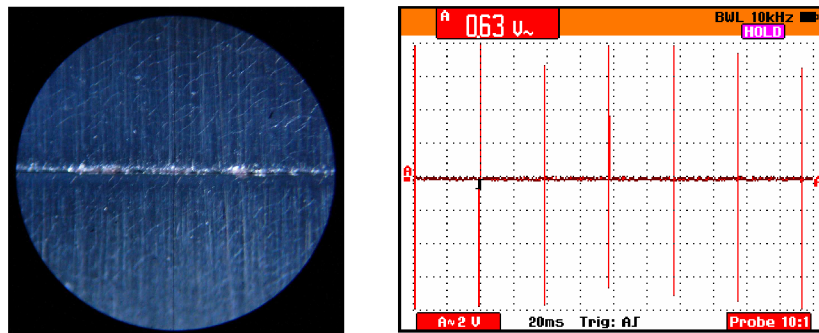
Prvním krokem zkoušek bylo skenování nenarušeného povrchu – bez povrchové vady. Jak je vidět na obr. 4.3, je signál roven prakticky základnímu šumu snímače. Pro snížení šumu generovaného reálnou drsností povrchu pístnice byla použita speciální clona (kotouč o průměru 20mm), která vycloní světlo rozptýlené v rovině definované osou pístnice a optickou osou snímače a v její blízkosti.



Obr. 4.4 Signál získaný na povrchu pístnice bez vady

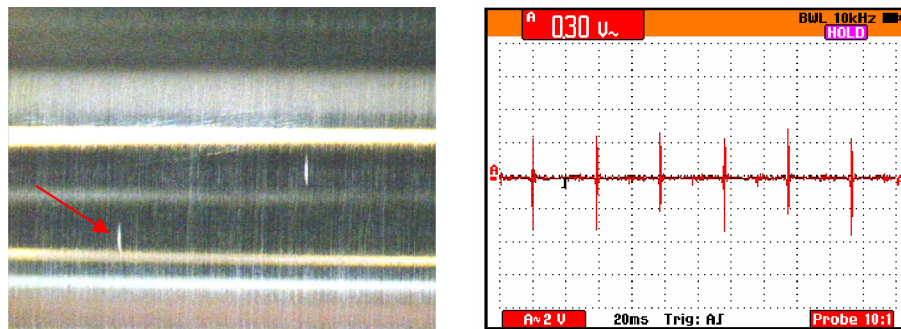
V dalších krocích modelových zkoušek se ověřovala metoda na jednotlivých pístnicích již s konkrétními vadami. Zkoušky probíhaly v základním nastavení snímače a bez automatického pojezdu snímače podél osy pístnice. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledné průběhy získaných signálů na jednotlivých vadách.

- **Podélná rýha**



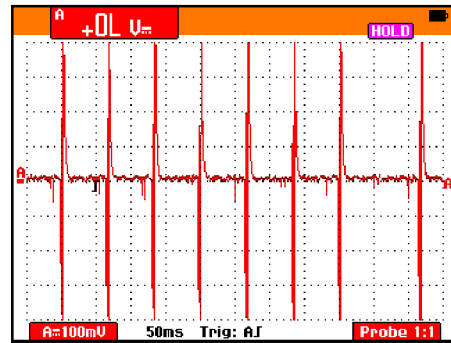
Obr. 4.5 Průběh napěťového signálu na podélné rýze (vzorek č. 1)

- **Příčná rýha**



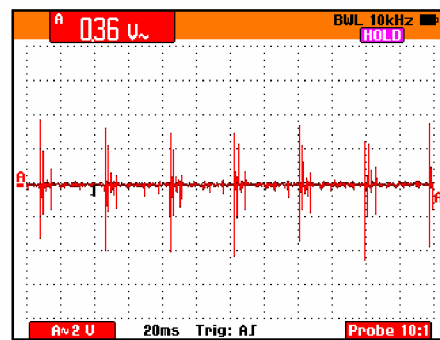
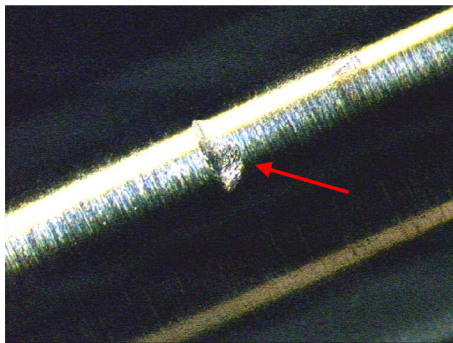
Obr. 4.6 Průběh napěťového signálu na příčné rýze (vzorek č. 7)

- Ploška na povrchu



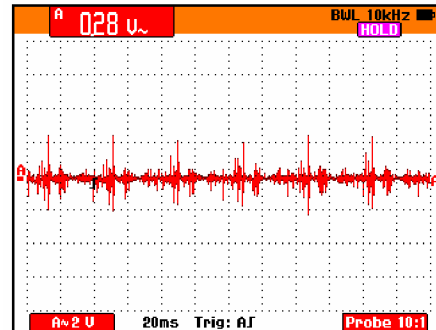
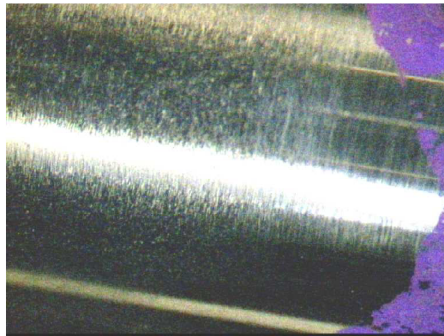
Obr. 4.7 Průběh napět'ového signálu na plošce (vzorek č. 5)

- Zásuky



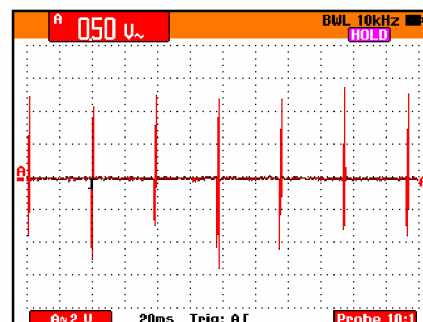
Obr. 4.8 Průběh napět'ového signálu na záseku (vzorek č. 3)

- Nedobroušený povrch



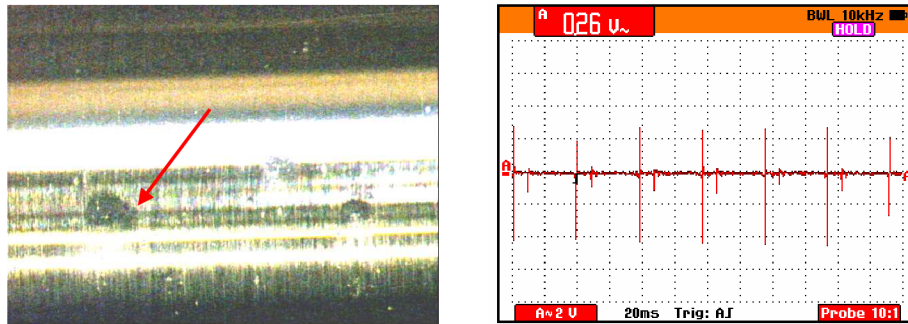
Obr. 4.9 Průběh napět'ového signálu na nedobroušeném povrchu (vzorek č. 2)

- Vytrhaný materiál – lunkr



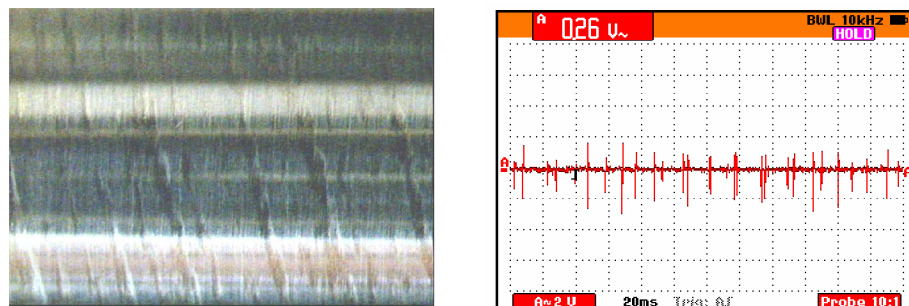
Obr. 4.10 Průběh napět'ového signálu na lunkru (vzorek č. 8)

- **Vtisk**



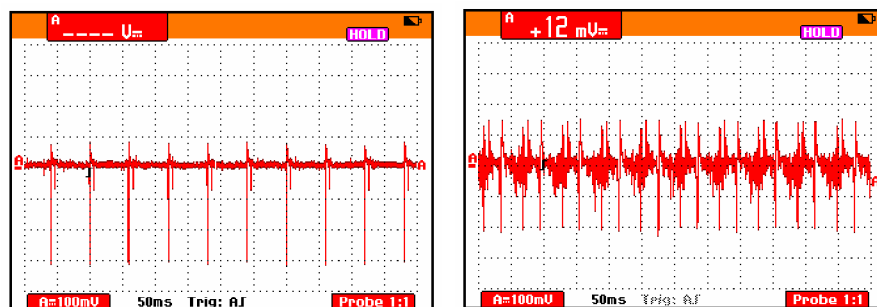
Obr. 4.11 Průběh napětového signálu na vtisku (vzorek č. 9)

- **Spirála**



Obr. 4.12 Průběh napětového signálu na spirále (vzorek č. 6)

V průběhu modelových zkoušek při kontrole pístnic byl ověřován i vliv znečištění povrchu pístnice na generovaný signál. Povrch pístnice byl uměle znečištěn.



Obr. 4.13 Signál na znečištěném povrchu prachovými částicemi (obrázek vlevo) a slabou vrstvou emulze a prachovými částicemi (obrázek vpravo)

4.2.2 Zhodnocení zkoušek na pístnicích

Z výsledků modelových zkoušek na pístnicích tlumičů je zřejmé, že použitá metoda snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání je vhodná pro detekci nepřijatelných povrchových vad definovaných výrobcem tlumičů. U dodaných vzorků pístnic je většina povrchových vad detekovatelná již při základním nastavení laserového snímače. Pouze u povrchové vady typu spirála se ukázalo, že laserový snímač v základním nastavení není schopný uvedenou vadu detekovat (nelze odlišit signál generovaný spirálou od signálu na přirozené drsnosti povrchu). Tento nedostatek je možné odstranit

naklopením laserového snímače o úhel 20° v úči ose pístnice a při zastaveném protáčení projet rychloposuvem přes celou délku funkční plochy pístnice.

Dále se projevil i podstatný vliv znečištění kontrolovaného povrchu na výsledky kontroly. Povrch znečištěný mastnotou nebo prachem velmi nepříznivě ovlivňuje výsledný generovaný napěťový signál (výrazné píky a šumové pozadí), který nelze spolehlivě odlišit od signálu na povrchové vadě. Z toho jednoznačně vyplývá nutnost očištění povrchu pístnice před vlastní kontrolou povrchových vad. K tomu v praxi např. slouží tzv. „pračky“, které součástky odmastí a následně tlakem vzduchu povrch vysuší a zbaví prachu. Po procesu čištění musí bezprostředně následovat proces kontroly vad.

5. PŘÍKLADY REALIZACE AUTOMATICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Na základě řady úspěšně proběhnutých modelových zkoušek metod detekce povrchových vad vyvíjených firmou Mesing bylo přistoupeno k realizaci několika kontrolních zařízení uvedených do praxe. Jedná se o plně automatická zařízení, která jsou ve většině případů začleněna přímo do výrobních linek. Při návrhu těchto zařízení se vycházelo z výsledků modelových zkoušek, prováděných autorem práce, který se podílel i na konstrukci těchto zařízení.

5.1 AUTOMAT NA KONTROLU POVRCHU VNĚJŠÍCH KROUŽKŮ VALIVÝCH LOŽISEK

Jako příklad první realizace lze uvést automat na kontrolu povrchu vnějších kroužků valivých ložisek. Na kroužcích se kontrolují povrchy čel a vnější válcové plochy, na kterých se v průběhu výroby mohou vyskytovat vady typu vytrhaného materiálu (lunkry), různé zábrusy či rýhy. K detekci těchto vad byla použita metoda snímání rozptýleného laserového paprsku vyvinutá ve spolupráci firmy Mesing a Ústavu měření SAV v Bratislavě.

5.2 AUTOMAT NA KONTROLU POUZDER VSTŘIKOVACÍCH ČERPANEL „COMMON RAIL“

Tento automat je určen ke kontrole vnějšího povrchu pouzder do vstřikovacích čerpadel COMMON RAIL. Na tomto velmi jemně broušeném povrchu se kontrolují lunkry a jemné rýhy o šířce v řádu setin mm. Ke kontrole automat využívá metodu snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání. Automat získal v roce 2007 Zlatou medaili na MSV v Brně.

5.3 AUTOMAT NA MĚŘENÍ ÚCHYLEK KRUHOVITOSTI OBĚŽNÝCH DRAH VNĚJŠÍCH KROUŽKŮ VALIVÝCH LOŽISEK

Firma Mesing v úzké spolupráci s německou firmou OptoSurf aplikovala optický snímač OptoSurf do automatu na měření úchylek kruhovitosti oběžných drah vnějších kroužků valivých ložisek. Jedná se o první automatické zařízení tohoto typu v Evropě. Automat je začleněn přímo ve výrobní lince, kde kontroluje povrch ve třech řezech v taktu pod 4 sekundy a s frekvencí snímání 1024/ sec. Aby mohl systém kontrolovat oběžnou dráhu vnějšího ložiskového kroužku, je

optický snímač vybaven speciální optikou, která umožňuje zalomit svazek paprsků o úhel 90°, tedy kolmo na kontrolovaný povrch.

System OptoSurf aplikovaný do tohoto automatu byl v loňském roce oceněn cenou Ministerstva hospodářství spolkové země Baden – Württemberg za významný vědecký počin.

5.4 AUTOMATICKÁ STANICE NA KONTROLU VAD VNITŘNÍHO ZÁVITU

V tomto případě se jedná o unikátní metodu vyvinutou firmou Mesing, která je aplikována do kontrolní automatické stanice určené ke kontrole povrchových vad na vnitřním závitě nábojů řemenic. Ke kontrole závitů je použit speciální závitový trn, který využívá metody založené na principu snímání poklesu tlaku vzduchu na povrchové vadě. Stanice je jako celek začleněna přímo do výrobní linky a díky třem paralelně umístěným kontrolním místům umožňuje kontrolu nábojů v taktu pod 4 sekundy. Dosud není známo žádné obdobné zařízení.

6. ZÁVĚR

V dnešní moderní době, pro kterou je charakteristická neustálá snaha o zvyšování výkonů a maximálních rychlostí, prodlužování životnosti či snižování emisí s ohledem na životní prostředí, se kladou stále přísnější požadavky na výslednou kvalitu strojírenských výrobků. Na jakost výrobků, resp. jejich funkčních ploch, má vliv celá řada faktorů. Mezi sledované parametry při hodnocení jakosti ve strojírenské výrobě patří mimo jiné dosažení požadované přesnosti rozměru, geometrického tvaru a polohy a v neposlední řadě také drsnosti povrchu jednotlivých funkčních ploch. I precizně zhotovený povrch může být v konečném důsledku zcela znehodnocen výskytem různých defektů (vad), které jsou však v oblastech přesné výroby (automobilový, ložiskový nebo letecký průmysl apod.) zcela nepřijatelné. Významný rozmach proto v posledních letech zaznamenává nový obor metrologie, který se zabývá detekcí povrchových vad.

Základním cílem této práce bylo provést komplexní rozbor příčin a důsledků vzniku nejčastěji se vyskytujících povrchových i podpovrchových vad, včetně rozboru běžně používaných metod jejich detekce, a na základě tohoto rozboru pak navrhnout metodu detekce povrchových vad na vysoce přesných strojních součástkách, která bude vhodná pro aplikaci do automatických kontrolních zařízení.

Z provedených rozborů je zřejmé, že se v praxi používá řada metod pro detekování vad materiálů a jejich povrchů. Obecně lze ale říci, že neexistuje žádná univerzální metoda, která by byla schopná kontrolovat všechny známé typy vad. Z tohoto důvodu je vždy nutné při návrhu vhodné metody vycházet z důležitých faktorů, jako jsou např. materiál, drsnost povrchu kontrolované plochy, typ, tvar, velikost, orientace nebo četnost vyskytujících se vad, a v neposlední řadě také požadovaná rychlost kontroly či finanční náročnost aplikace, která velmi často hraje zásadní roli. Pro kontrolu vysoce přesných

součástek je většina běžně používaných metod prakticky nepoužitelná. Ve většině případů jsou příliš pomalé nebo nejsou schopny zachytit vady o velikosti v řádu setin mm.

V rámci této disertační práce byla navržena nová bezkontaktní optická metoda, která je založena na principu snímání rozptýleného laserového paprsku na povrchové vadě. Tato metoda byla vyvinuta ve spolupráci firmy Mesing, spol. s r.o. a Ústavu měření SAV v Bratislavě, za finanční podpory grantu získaného na tento projekt od MPO ČR. Autor disertační práce je členem řešitelského týmu a je zodpovědný za vývoj nových metod a jejich ověřování pro následnou aplikaci do kontrolních zařízení. Spolupodílel se i na konstrukci těchto zařízení.

V praktické části práce byla navržená metoda podrobena řadě ověřovacích modelových zkoušek na čtyřech typech vzorků součástek dodaných jejich výrobcí. Pro účely provedení zkoušek byla autorem navržena dvě modelová zařízení.

Na základě analýzy dosažených výsledků modelových zkoušek lze konstatovat, že metoda snímání rozptýleného laserového paprsku je vhodná pro detekování povrchových vad na poskytnutých vzorcích. Získaný napěťový signál na povrchových vadách je ve většině případů velmi dobře rozpoznatelný od základního šumu generovaného reálnou drsností nenarušeného povrchu. Kontinuálně vyzařovaný svazek laserových paprsků navíc umožňuje i velmi vysokou rychlost kontroly (až 2000mm/ s). Díky vysoké rychlosti kontroly a malým rozměrům laserového snímače ($\phi 25 - 65\text{mm}$) lze tuto metodu aplikovat přímo do kontrolních zařízení (stanice, automaty) zařazených přímo do výrobních linek. Zde je však důležité poznamenat, že modelové zkoušky proběhly pouze na čtyřech typech vzorků, z čehož nelze spolehlivě usuzovat, že navržená metoda je obecně vhodná. Každé realizaci kontrolního zařízení musí nezbytně předcházet soubor důkladných modelových zkoušek, na jejichž základě se rozhodne, zda navrhovaná metoda je, či není vhodná pro detekování povrchových vad na konkrétní součástce.

V závěrečné části práce jsou představeny příklady úspěšných aplikací metody snímání rozptýleného laserového světla v praxi realizovaných firmou Mesing, při nichž byly využity výsledky modelových zkoušek provedených autorem práce. V evropském měřítku se ve většině případů jedná o ojedinělá zařízení. Metoda snímání rozptýleného laserového paprsku v koaxiálním uspořádání byla na MSV v Brně v roce 2007 oceněna Zlatou medailí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Kopec, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
- [2] Perníkář, J. – Tykal, M. – Vačkář, J.: Jakost a metrologie. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2001, ISBN 80-214-1997-0
- [3] Perníkář, J. – Tykal, M.: Strojírenská metrologie. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2006, ISBN 80-214-3338-8
- [4] Dorazil, E.: Nauka o materiálu I. Ediční středisko VUT, Brno 1989, ISBN 80-214-1028-0
- [5] Kolektiv autorů: Technologie I. Nakladatelství PC-DIR, Brno 1995, ISBN 80-214-0689-5
- [6] Vojtěch, D.: Kovové materiály. VŠCHT Praha, 2006, ISBN 80-7080-600-1
- [7] Kratochvíl, B. – Švorčík, V. – Vojtěch, D.: Úvod do studia materiálu. VŠCHT Praha, 2005, ISBN 80-7080-568-4
- [8] Molliková, E.: Zkoušení materiálů a výrobků – interaktivní výukový materiál, učební text VUT FSI, 2005
- [9] Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I., Akademické nakladatelství CERM, Brno 2003, ISBN 80-7204-193-2
- [10] Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu II., Akademické nakladatelství CERM, Brno 2002, ISBN 80-7204-130-4
- [11] Brodmann, R.: Optické měření drsnosti povrchu a rozměrů v laboratoři a výrobě. Media Praha & Oveskon Braunschweig, 1988
- [12] Brodmann, R. – Allgäuer, M.: Comparison of light scattering from rough surfaces with optical and mechanical profilometry. Proc. SPIE, 1988
- [13] Brodmann, R. a kol.: Kenngrößen der Mikrostruktur definiert. QZ Qualität und Zuverlässigkeit 7/ 2008, Carl Hanser Verlag München
- [14] Brodmann, R. – Brodmann, B. – Kúr, B. – Smutný, D.: Schnelles Tagaz von Rattermarken in der Fertigung, QZ Qualität und Zuverlässigkeit 5/ 2009, Carl Hanser Verlag München
- [15] Kudela, M.: Příručka obrábění – kniha pro praktiky. 1. vydání 1997, Nakladatelství Scientia Praha, ISBN 91-97 22 99-4-6
- [16] Tesařík, O.: Speciální technologie, část „Konstrukce měřidel“. 1. vydání, Vydavatelství VUT Brno
- [17] Machek, V. – Sodomka, J.: Nauka o materiálu I. (přednášky), ČVUT Praha 2000
- [18] Oberflächenmesssystem OS 500, Bedienungsanleitung OptoSurf, version 3.0, 7/ 2008

- [19] ČSN ISO 4287-1: Drsnost povrchu. Názvosloví. Část 1: Povrch a jeho parametry
- [20] ČSN ISO 4287-2: Drsnost povrchu. Terminologie. Část 2: Měření parametrů drsnosti povrchu
- [22] ČSN EN 571-1: Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady
- [22] ČSN EN 1289: Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení svarů kapilární metodou
- [23] ČSN EN ISO 9934-1: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 1: Všeobecné zásady
- [24] ČSN EN ISO 9934-2: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 2: Zkušební prostředky
- [25] ČSN EN ISO 9934-3: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 3: Přístroje
- [26] ČSN EN 583-1: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 1: Všeobecné zásady
- [27] ČSN EN 583-3: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 3: Průchodová technika
- [28] ČSN EN 583-4: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 4: Zjišťování vad kolmých k povrchu
- [29] ČSN EN 583-5: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 5: Charakterizace a určení velikosti vad
- [30] ČSN EN 12084: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení vířivými proudy – Všeobecné zásady a směrnice
- [31] ČSN EN 444: Nedestruktivní zkoušení – Základní pravidla pro radiografické zkoušení kovových materiálů rentgenovým zářením a zářením gama
- [32] Katalog povrchových vad, Mesing, spol. s r.o., Brno
- [33] Firemní materiály společnosti Mesing, spol. s r.o., Brno
- [34] Firemní materiály společnosti OptoSurf GmbH, Ettlingen
- [35] Internetové stránky www.sensopart.com
- [36] Internetové stránky www.micro-epsilon.cz
- [37] Internetové stránky www.keyence.de

SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ

Kružík, M. – Musil, M. – Smutný, D.: Analýza nejistot při vyhodnocování úchylek rovinnosti, 30 stran, Brno 2004, ISBN 80 – 214 – 2291 – 4

Kocman, K. – Pernikář, J. – Kružík, M. – Musil, M. – Smutný, D.: Hodnocení metrologických charakteristik měřicích prostředků pro měření vysoce přesných rozměrů, Brno 2004, 42 stran, ISBN 80 – 214 – 2786 – 8

Pernikář, J. – Kružík, M. – Smutný, D.: Jakost a metrologie, interaktivní studijní opory VUT – FSI, Brno 2005, 25 odkazů, <http://www.umz.cz>

Pernikář, J. – Kružík, M. – Smutný, D.: Řízení jakosti 2, interaktivní studijní opory VUT – FSI, Brno 2005, 14 odkazů, <http://www.umz.cz>

Kružík, M. – Smutný, D.: Transparentní otisky povrchů kondenzačními hmotami pro měření drsnosti ploch s aplikačním využitím v technické praxi, zpráva grantu, projekt fondu vědy FSI, 26 stran, Brno 2005

Kůr, B. – Smutný, D.: Novinky v měřicí technice Mesing, časopis Metrologie 4/ 2006, str. 38, ISSN 1210 – 3543

Kůr, J. – Smutný, D. – Kůr, B. – Hain, M. – Bartl, J. – Jacko V.: Bezkontaktní laserová měřicí zařízení Mesing k určování povrchových defektů, časopis Metrologie 1/ 2007, str. 41, ISSN 1210 – 3543

Kůr, B. – Smutný, D. – Hain, M. – Bartl, J. – Jacko, V.: Kontrola povrchových defektů součástek, Technický týdeník 3/ 2007, str. 26, ISSN 0040 – 1064

Bartl, J. – Jacko, V. – Hain, M. – Smutný, D.: Optické snímače povrchu přesných strojářských súčiastok, časopis Jemná mechanika a optika 5/ 2007, str. 139 – 143, ISSN 0447 – 6441

Smutný, D.: Kontrola povrchových vad, časopis Technika 5/ 2007, str. 58, ISSN 1337 – 0022

Smutný, D. – Ošlejšek, L.: Zlatá medaile pro Mesing na MSV Brno 2007, časopis Metrologie 4/ 2007, str. 38, ISSN 1210 – 3543

Smutný, D. – Ošlejšek, L.: Měřicí technika Mesing, časopis Automobil Industry 10/ 2007, str. 60, ISSN 1802 – 5196

Smutný, D.: Mesing získal Zlatou medaili na MSV Brno 2007, časopis Strojírenství 11/ 2007, str. 34, ISSN 1335 – 2938

Kůr, J. – Smutný, D. – Šmída, R.: Novinky v měřicí technice pro automobilový průmysl, časopis AI magazine 2/ 2008, str. 38 – 39, ISSN 1337 – 7612

Smutný, D. – Konečný, P.: Jednoduchá měřidla úchylek přímosti a rovinnosti, časopis Metrologie 2/ 2008, str. 39 – 40, ISSN 1210 – 3543

- Kůr, J. – Smutný, D. – Šmída, R.: Nové trendy zejména pro zakázkovou provozní měřicí techniku, časopis Metrologie 4/ 2008, str. 39 – 40, ISSN 1210 – 3543
- Kůr, J. – Smutný, D.: Některé nové prvky pro měřicí techniku ke kontrole autodílů, časopis Automobil Industry 5/ 2008, str. 12 – 13, ISSN 1802 – 5196
- Smutný, D. – Ošlejšek, L.: Netradiční průměrová dílenská měřidla, časopis MM Průmyslové spektrum 6/ 2008, str. 29, ISSN 1212 – 2572
- Kůr, J. – Smutný, D.: Měřicí technika pro ložiskovou výrobu, časopis Strojírenství 7-8/ 2008, str. 64 – 65, ISSN 1335 – 2938
- Kůr, J. – Smutný, D. – Šmída, R.: Boom laserových metod v metrologii, časopis Automotive Engineering – Automotive revue 9-10/ 2008, str. 83– 85, ISBN 978-80-969789-4-6
- Kůr, J. – Šmída, R. – Smutný, D. – Číp, O.: Nanometrologie v automobilovém průmyslu, časopis Automotive Engineering 9-10/ 2008, str. 54, ISSN 1337 – 7671
- Číp, O. – Čížek, M. – Buchta, Z. – Mikel, B. – Lazar, J. – Konečný, P. – Kůr, J. – Wíttek, R. – Smutný, D. – Balling, P. – Křen, P.: Laserový komparátor, časopis Strojírenství 11/ 2008, str. 92 – 93, ISSN 1335 – 2938
- Číp, O. – Buchta, Z. – Mikel, B. – Lazar, J. – Kůr, J. – Wíttek, R. – Konečný, P. – Smutný, D. – Balling, P. – Křen, P.: Laserkomparator für die Kalibrierung von Längentastern, časopis Jemná mechanika a optika 11-12/ 2008, str. 301 – 302, ISSN 0447 – 6441
- Kůr, J. – Smutný, D. – Kracik, P.: Novinky Mesing pro automobilový průmysl na MSV Brno 2009, časopis AI magazine 3/ 2009, str. 32 – 33, ISSN 1337 – 7612
- Kůr, J. – Smutný, D. – Kracik, P.: Mesing na MSV Brno 2009, časopis Metrologie 3/ 2009, str. 39 – 40, ISSN 1210 – 3543
- Kůr, J. – Smutný, D. – Číp, O.: Přesná kalibrační měřidla zvyšují úroveň podnikové metrologie, časopis AI magazine 4/ 2009, str. 33, ISSN 1337 – 7612
- Kůr, J. – Smutný, D. – Kracik, P.: Zakázková měřicí technika Mesing pro výrobu pneumatických a hydraulických prvků, Technický týdeník 5/ 2009, str. 31, ISSN 0040 – 1064
- Brodmann, R. – Brodmann, B. – Kůr, B. – Smutný, D.: Schnelles Messen von Ratermarken in der Fertigung, časopis Qualität und Zuverlässigkeit 5/ 2009, str. 69 – 72, ISSN 0720 – 1214
- Kůr, J. – Smutný, D. – Kracik, P.: Automatické měření povrchových defektů, úchylek geometrického tvaru a drsnosti, časopis Metrologie 9/ 2009, str. 39 – 40, ISSN 1210 – 3543

Kůr, J. – Smutný, D. – Kracík, P.: Mesing na MSV Brno 2009, časopis Jemná mechanika a optika 9/ 2009, str. 259 – 260, ISSN 0447 – 6441

Kůr, J. – Smutný, D.: Zakázková vícemístná měřicí pracoviště Mesing, časopis AI magazine 1/ 2010, str. 22 – 23, ISSN 1337 – 7612

Kůr, J. – Smutný, D.: Směry vývoje metrologie pro automobilový průmysl, časopis AI magazine 2/ 2010, str. 28 – 29, ISSN 1337 – 7612

Semináře a přednášky

Smutný, D.: Měřidla pro kontrolu povrchových vad, mezinárodní seminář pořádaný Českou metrologickou společností, Plzeň 2007

Smutný, D.: Novinky v měřicí technice Mesing, mezinárodní seminář pořádaný Českou metrologickou společností, Plzeň 2008

Smutný, D. – Kracík, P.: Zakázková měřicí a automatizační technika Mesing, mezinárodní seminář pořádaný Českou metrologickou společností, Plzeň 2009

Smutný, D.: Automatizace měření a nové směry ve vývoji měřicí techniky, přednáška pro studenty, ČVUT 2009

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Ing. Daniel Smutný
Datum a místo narození: 28.4.1978, Kroměříž
Adresa bydliště: Veveří 69, 602 00 Brno
Telefon: +420 732 385 763
E-mail: dsmutny@email.cz

Vzdělání:

09/1993 - 06/1997 **ISŠ automobilní Brno**
Obor: Provoz a údržba silničních vozidel
Ukončení: Maturita

09/1997 - 06/1998 **ISŠ automobilní Brno**
Obor: Automechanik
Ukončení: Výuční list

09/1998 - 06/2003 **Vysoké učení technické, FSI Brno**
Obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Studium: Magisterské
Ukončení: Státní závěrečná zkouška

09/2003 - doposud **Vysoké učení technické, FSI Brno**
Obor: Metrologie a zkušebnictví
Studium: Doktorské

Profesní praxe:

06/2005 - doposud **Mesing s.r.o., Brno**
Činnost firmy: Výroba zakázkové měřicí a automatizační techniky
Pozice: Konstruktor a vývojový pracovník

Jazykové znalosti:

Německý jazyk: Středně pokročilá znalost

Ostatní dovednosti:

Práce na PC: Windows, MS Office, Outlook, AutoCad LT, SolidWorks

Řidičský průkaz: skupina B